热光近场空间相干性的多视图立体成像及三维重建方法

张孝伍[1]

[1](青岛理工大学理学院,山东青岛 266520)

摘　要: 立体视觉是根据人双眼、昆虫复眼深度视觉原理,通过多个摄像机从不同角度同时获得周围景物的多幅数字图像,由立体匹配技术得到多幅图像上的对应点,并且由对应点的视差信息重建三维物体图像.现有的多目视觉三维重建和立体匹配方法的生物学机制仍然未知,也不知道人双眼和昆虫复眼是如何感知深度信息、进行快速准确立体匹配的.通过热光的近场高阶空间相干性,研究了多视图立体视觉的神经生物学机制,给出了双视图和多视图立体视觉的三维重建公式.得到的结果与视觉神经科学的理论一致.

关键词: 立体视觉; 三维重建; 高阶相干性; 立体成像系统; 实时立体匹配

分类号: O431.2

Multi view Stereo Imaging Mechanism and Three-dimensional Reconstruction Method of Thermo optical Near field Spatial coherence

Zhang Xiaowu

(School of science, Qingdao University of Technology,Shandong Qingdao 266520,China)

Abstract: Stereo vision is based on the principle of human binocular and insect compound eye depth vision, obtaining multiple digital images of the surrounding scene from different angles through multiple cameras, obtaining corresponding points on multiple images through stereo matching technology, and reconstructing 3D object images from the parallax information of corresponding points. The neurobiological mechanism of the existing Iterative reconstruction and stereo matching methods of binocular vision is still unknown, The neurobiological mechanism of dual view stereo vision is studied, and the Iterative reconstruction formula of dual view and multi view stereo vision is given. The conclusions obtained are consistent with the theory of visual neuroscience.

Key words: stereo vision; three dimensional reconstruction; second-order coherence;stereoscopic imaging system; real time stereo matching

1 引 言

多视图立体视觉的基本原理是从两个以上不同地点观看同一景物[1,2,3,4],获得在不同视角下的多幅感知图像,然后通过三维重建方法和立体匹配原理计算多幅图像像素间对应点的位置视差来重建景物的立体图形,这一过程与人类双眼视觉和昆虫复眼视觉的立体感知过程类似.三维重建方法有射影重建、仿射重建和欧氏几何重建等方法.双眼视差有以视网膜为中心的双眼视差、以头部为中心的双眼视差和两个物体间的相对视差.

射影重建有基于基础矩阵的重建、基于双代数的重建和基于三线约束关系的重建,O.Fa-ugeras 将基础矩阵用于射影重建,Hartley 等人对 Faugeras 的重建方法做了一些改进和发展.G.C.Rota 等学者对 19 世纪的双代数射影几何重建给出改进,Carlsson 推导了一些双代数形式的不变量表达式,A.Shashua 利用几何不变量理论得到 3 幅二维图像间对应匹配点坐标的三线约束关系.

基金项目: 山东省本科教学改革资助项目(Z2021114)

仿射重建有基于模约束的重建和基于摄像机平移运动的重建,Luong 等学者将模约束的概念来进行摄像机自标定,Peter Sterm 利用图像中的灭点及模约束来实现物体的仿射重建,当摄像机在两幅图像间平移运动时,两幅图像间的仿射变换可实现物体的三维重建.

在欧氏几何下,三维重建的一般方法是在左右摄像机内外参数已知时,计算出空间直线重组三维面、二次曲面,然后重建出三维物体立体图像.当左摄像机坐标系和右摄像机坐标系平行时,可以通过立体成像几何法得到三维重建公式.一般情形下二维成像图像和三维场景之间存在着投影关系,这种投影关系是摄像机的投影矩阵,可以通过左右两幅图像上少量的对应点信息来恢复投影矩阵,由左右双摄像机投影矩阵,利用最小二乘法得到精度比较高的图像上每一点的深度信息,从而重建物体的三维图像.

复眼多目视觉由多视图几何的多视图张量[5],产生多幅图像测量坐标的多重线性关系,每幅图像的摄像机矩阵从张量计算得到,三维立体图像可以由恢复的摄像机和多幅图像上的对应点视差计算得到.

人类立体视觉系统通过双眼视差感知三维信息,文献[6,7,8]中描述了双眼视差的基本原理和类型.如图 1 所示,以视网膜为中心的双眼视差是物体A为$\alpha_L-\alpha_R$,物体B为$\beta_L-\beta_R$,以头部为中心的双眼视差是物体A为$(\alpha_L+\gamma_L)-(\alpha_R+\gamma_R)$,物体$B$为$(\beta_L+\gamma_L)-(\beta_R+\gamma_R)$,物体$A$、$B$的双眼相对视差都是$(\alpha_L-\alpha_R)-(\beta_L-\beta_R)$.

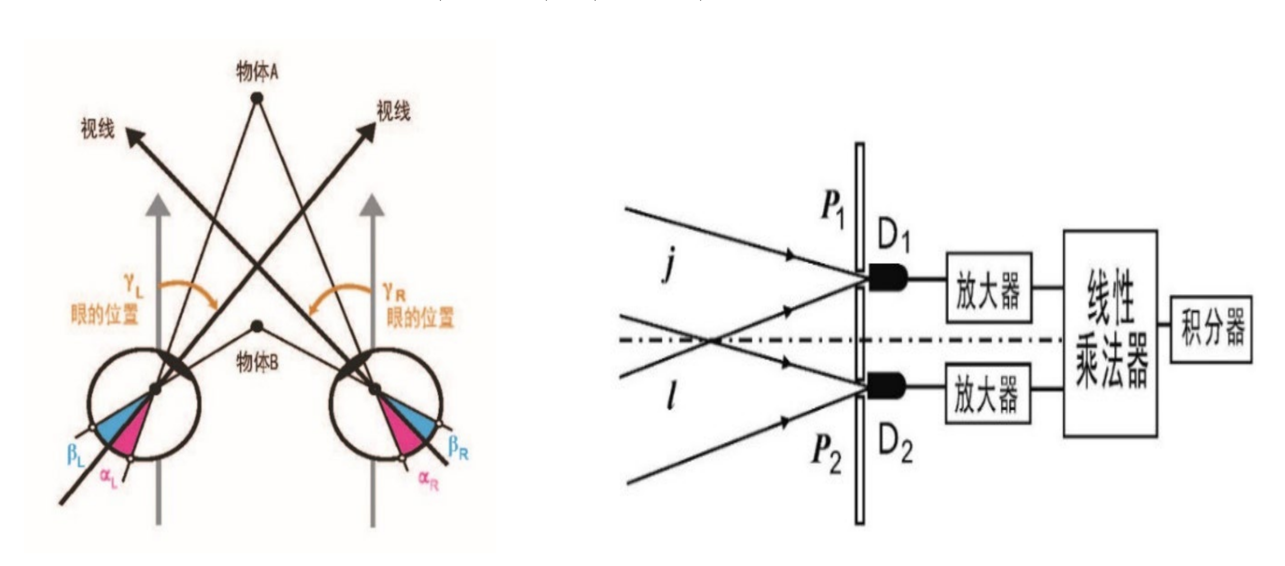


图 1 视网膜视差和以头为中心的视差图　　图 2 HBT 干涉仪

人双眼的立体匹配在观看场景物体的同时自然发生的,但双目视觉与人双眼不同,需要经过专门的立体匹配方法才能得到左右两幅图像上的对应点.目前为止还没有学者运用量子光学的热光近场二阶相干性来研究双眼立体视觉的感知机制.

文南献[9,10,11]详细介绍了热光近场的一阶相干性、二阶相干性、高阶相干性和量子成像,热光的近场的二阶相干函数$\Gamma^{(2)}(\vec{q}_1,t_1;\vec{q}_2,t_2)$是由两个光探测器分别在时空点$(\vec{q}_1,t_1)$和$(\vec{q}_2,t_2)$的光场$E(\vec{q}_j,t_j)$作直接符合测量,如图 2 所示的 HBT 干涉仪[9],由放在小孔后面的两台独立光探测器对发生在时空点$(\vec{q}_1,t_1)$和$(\vec{q}_2,t_2)$处的两个不同的事件做联合观测,图 2 中的观测是基于电学的线性乘法器处的联合电流:

$$i_1(t)i_2(t)\propto I_1(\vec{q}_1,t_1)I_2(\vec{q}_2,t_2)=E^*(\vec{q}_1,t_1)E(\vec{q}_1,t_1)E^*(\vec{q}_2,t_2)E(\vec{q}_2,t_2).$$

二阶相干函数$\Gamma^{(2)}$与一阶相干函数$\Gamma^{(1)}_{11}$、$\Gamma^{(1)}_{22}$和$\Gamma^{(1)}_{12}$有关：$\Gamma^{(2)}=\Gamma^{(1)}_{11}\Gamma^{(1)}_{22}+\Gamma^{(1)}_{12}$. N阶相干函数是：

$$\Gamma^{(N)}(\vec{q}_1,z_1;\cdots,\vec{q}_N,z_N)=\langle E^*(\vec{q}_1,z_1)E(\vec{q}_1,z_1)E^*(\vec{q}_2,z_2)E(\vec{q}_2,z_2)\cdots E^*(\vec{q}_N,z_N)E(\vec{q}_N,z_N)\rangle.$$

设$O_l(x_l,y_l,z_l)$是左摄像机坐标系，$O_r(x_r,y_r,z_r)$是右摄像机坐标系，$O_w(x_w,y_w,z_w)$是世界坐标系，$\vec{P}_l$、$\vec{P}_r$和$\vec{P}_w$分别是三个坐标系O_l、O_r和O_w中的点. 通过图像特征点匹配、对极几何恢复、稀疏匹配和稠密匹配、局部匹配和全局匹配等立体匹配方法，找到左边图像和右边图像上的对应点$\vec{q}_{wl}$和$\vec{q}_{wr}$. 到目前为止，双眼立体视觉和实时立体匹配方法的生物学机制和理论模型仍然未知.

文中将两个独立的联合二阶相干测量变成双目成像系统的联合符合测量，则二阶相干函数$\Gamma^{(2)}$测量的结果就是双目视觉的立体成像. 本文得到的主要结果是：

(1)、根据三角测量原理得到双目视图立体视觉成像的三维重建公式：

$$\vec{P}_w=\frac{1}{m}\frac{\vec{q}_{wl}+\vec{q}_{wr}}{2}+\left(1-\frac{1}{m}\right)\frac{\vec{t}_{wl}+\vec{t}_{wr}}{2}. \quad (1)$$

其中$m_l=m_r=m=\frac{|\vec{q}_{wl}-\vec{q}_{wr}-(\vec{t}_{wl}-\vec{t}_{wr})|}{|\vec{t}_{wl}-\vec{t}_{wr}|}$或者$m=1\pm\frac{|\vec{q}_{wl}-\vec{q}_{wr}|}{|\vec{t}_{wl}-\vec{t}_{wr}|}$是摄像机成像系统的放大率，$\vec{t}_{wl}$、$\vec{t}_{wr}$分别是左右摄像机在世界坐标系中的平移位置向量，$\vec{q}_{wl}-\vec{q}_{wr}$是以视网膜为中心的双眼视差，

$(\vec{q}_{wl}-\vec{t}_{wl})-(\vec{q}_{wr}-\vec{t}_{wr})$是以头部为中心的双眼视差.

(2)、设$|V|$个摄像机分别位于连通图$G=G(V,E)$的节点上，其中V、E分别是G的节点集、边集，q_{wu}是第$u(u\in V)$幅图像上的成像点，则多目视图立体视觉成像的三维重建公式为：

$$\vec{P}_w=\frac{1}{|E|}\sum_{(u,v)\in E}\left(\frac{\vec{q}_{wu}+\vec{q}_{wv}}{m_u+m_v}+\frac{(m_u-1)\vec{t}_{wu}+(m_u-1)\vec{t}_{wv}}{m_u+m_v}\right). \quad (2)$$

其中$\vec{t}_{wu}$是第$u(u\in V)$个摄像机在世界坐标系中的平移位置向量，m_u是第u个摄像机的放大率.

(3)、根据热光的近场二阶空间相干性得到双视图立体成像的三维重建公式：

$$\Gamma^{(1)}_{lr}(\vec{q}_{wl};\vec{q}_{wr})\propto|e^{i\frac{\omega}{2cs_i}(|\vec{q}_{wl}|^2-|\vec{q}_{wr}|^2)}\int_{obj}d\vec{q}_oA^2(\vec{q}_0)somb\left(\frac{R}{s_o}\frac{\omega}{c}|\vec{q}_o+\frac{\vec{q}_{wl}+\vec{q}_{wr}}{2m}|\right)somb\left(\frac{R}{s_i}\frac{\omega}{c}|\vec{q}_{wl}-\vec{q}_{wr}|\right)|^2. \quad (3)$$

其中$somb(x)=\frac{2J_1(x)}{x}$, $J_1(x)$是一阶贝赛尔函数, s_o是物体和成像透镜间的距离, s_i是成像透镜和像平面间的距离, R是成像透镜半径, $A(\vec{q}_o)$是物体光场的分布函数, $m=\frac{s_i}{s_o}$是成像系统的放大率, $|\vec{q}_{wl}-\vec{q}_{wr}|$为双眼视差.

(4)、设$|V|$个光探测器分别位于连通图$G=G(V,E)$的节点上, 其中V、E分别是G的节点集、边集, $U\subset V$, $G_U=G(V-U,E_U)$是节点集为$V-U$的G的子图, 子图G_U中没有孤立节点, 若G_U有孤立节点, 则将这个节点加入到U中, 重新得到的子图就没有孤立节点. 假设$|V|$个成像系统的各个参数都相同, 任意的节点u、$v\in V$, $s_{ou}=s_{ov}=s_o, s_{iu}=s_{iv}=s_i, m_u=m_v=m, f_u=f_v=f, z_u=z_v=d$. 根据热光的近场$|V|$阶空间相干性得到多视图立体成像的三维重建公式:

$$\Gamma^{(|V|)}(\vec{q}_{w1},\cdots,\vec{q}_{w|V|})\propto\sum_{U\subset V}\prod_{(u,v)\in E_U}\left(\left|e^{i\frac{\omega}{2cs_i}(|\vec{q}_{wu}|^2-|\vec{q}_{wv}|^2)}\int_{obj}d\vec{q}_o A^2(\vec{q}_0)somb\left(\frac{R}{s_o}\frac{\omega}{c}|\vec{q}_o+\frac{\vec{q}_{wu}+\vec{q}_{wv}}{2m}|\right)\right.\right.$$
$$\left.\left.\times somb\left(\frac{R}{s_i}\frac{\omega}{c}|\vec{q}_{wu}-\vec{q}_{wv}|\right)\right|^2\right). \quad (4)$$

(5)、(1)式和(3)式, (2)式和(4)式的三维重建公式分别相似, 表明人双眼和昆虫复眼感知到立体成像是视觉神经系统中的对双眼和复眼都有感知的眼优势细胞对多个视网膜上的多视图成像对应点进行热光近场$|V|$阶相干测量的结果. 测量热光二阶相干性的干涉仪将左右两幅图像进行深度融合感知, 测量热光二阶空间相干性的立体成像过程的同时就自动完成了双眼对应点的立体匹配.

2 双目视觉及多目视觉成像的三维重建公式

三角形测量原理如图 3 所示[2], 摄像机坐标系是(x_c,y_c,z_c), 成像平面是$z_c=f_c$. 设$\vec{q}_c=(u,v,w)^T$是图像平面上任一点, $\vec{P}_c=(x_c,y_c,z_c)^T$是空间中的任一点, 由三角形相似原理有:

$$u=\frac{x_c}{z_c}f_c, v=\frac{y_c}{z_c}f_c, w=f_c, \vec{q}_c=\frac{f_c}{z_c}\vec{p}_c.$$

设 $m_c=\frac{f_c}{z_c}$, m_c是成像放大率, 则有:

$$(u,v,w)=(\frac{x_c}{z_c}f_c,\frac{y_c}{z_c}f_c,f_c)=\frac{f_c}{z_c}(x_c,y_c,z_c), \vec{q}_c=m_c\vec{P}_c. \quad (5)$$

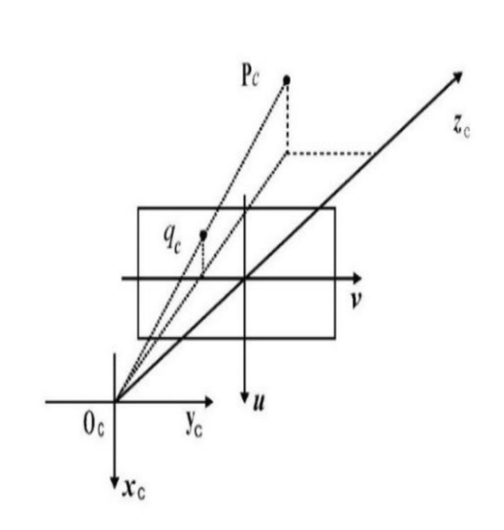


图 3 三角形测量原理图

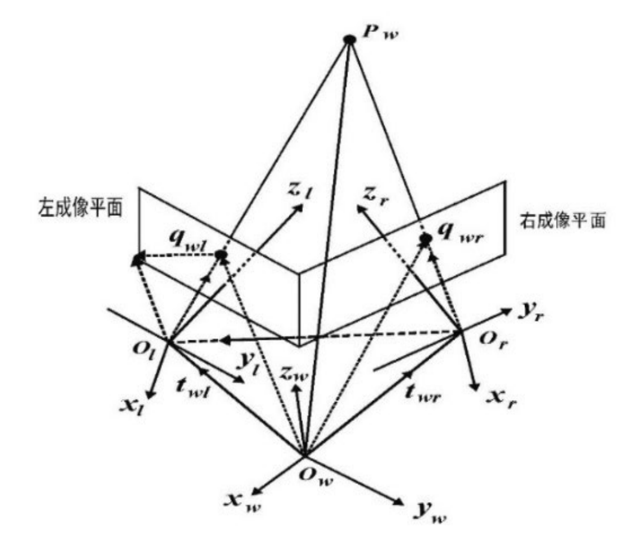


图 4 汇聚式光轴双目成像几何原理图

双目汇聚式光轴立体成像几何原理如图 4 所示，三个坐标系$O_l(x_l,y_l,z_l)$、$O_r(x_r,y_r,z_r)$、$O_w(x_w,y_w,z_w)$之间的坐标变换是：

$$\vec{P}_l=R_l\vec{P}_w+\vec{t}_{lw}=R_l(\vec{P}_w-\vec{t}_{wl}),\vec{P}_r=R_r\vec{P}_w+\vec{t}_{rw}=R_r(\vec{P}_w-\vec{t}_{wr}). \quad (6)$$

其中R_l、R_r是坐标系之间的旋转矩阵.

由公式(5)和(6)得：$\vec{q}_l=m_l\vec{P}_l$，$\vec{q}_r=m_r\vec{P}_r$，$\vec{q}_l=R_l(\vec{q}_{wl}-\vec{t}_{wl}),\vec{q}_r=R_r(\vec{q}_{wr}-\vec{t}_{wr})$，

所以有：$R_l(\vec{q}_{wl}-\vec{t}_{wl})=m_lR_l(\vec{P}_w-\vec{t}_{wl}),R_r(\vec{q}_{wr}-\vec{t}_{wr})=m_rR_r(\vec{P}_w-\vec{t}_{wr})$

R_l和R_r都是可逆矩阵，于是有$\vec{q}_{wl}-\vec{t}_{wl}=m_l(\vec{P}_w-\vec{t}_{wl}),\vec{q}_{wr}-\vec{t}_{wr}=m_r(\vec{P}_w-\vec{t}_{wr})$，解得：

$$\vec{P}_w=\frac{\vec{q}_{wl}+\vec{q}_{wr}}{m_l+m_r}+\frac{(m_l-1)\vec{t}_{wl}+(m_r-1)\vec{t}_{wr}}{m_l+m_r}. \quad (7)$$

$$\frac{\vec{q}_{wl}+(m_l-1)\vec{t}_{wl}}{m_l}=\frac{\vec{q}_{wr}+(m_r-1)\vec{t}_{wr}}{m_r}. \quad (8)$$

当左右摄像机的放大率$m_l=m_r=m$时，由(7)式得：

$\vec{P}_w=\frac{1}{2m}(\vec{q}_{wl}+\vec{q}_{wr})+\frac{m-1}{2m}(\vec{t}_{wl}+\vec{t}_{wr})$，于是得到公式(1)，并且有：

$$m(\vec{t}_{wr}-\vec{t}_{wl})=\vec{q}_{wl}-\vec{q}_{wr}-(\vec{t}_{wl}-\vec{t}_{wr}),\text{或者}(1-m)(\vec{t}_{wl}-\vec{t}_{wr})=\vec{q}_{wl}-\vec{q}_{wr}.$$

这两个等式两边取向量的长度得：

$$m=\frac{|\vec{q}_{wl}-\vec{t}_{wl}-(\vec{q}_{wr}-\vec{t}_{wr})|}{|\vec{t}_{wl}-\vec{t}_{wr}|},\text{或者}m=1\pm\frac{|\vec{q}_{wl}-\vec{q}_{wr}|}{|\vec{t}_{wl}-\vec{t}_{wr}|}.$$

根据双眼视差的定义[7]和图 1、图 4 可知，$(\vec{q}_{wl}-\vec{t}_{wl})-(\vec{q}_{wr}-\vec{t}_{wr})$是以头部为中心的双眼视差，$\vec{q}_{wl}-\vec{q}_{wr}$是以视网膜为中心的双眼视差.

设$|V|$个摄像机分别位于连通图$G=G(V,E)$的节点上，其中V、E分别是G的节点集、边集. 对于多目立体视觉，第$u(u\in V)$个摄像机几何模型是$\vec{q}_{wu}-\vec{t}_{wu}=m_u(\vec{P}_w-\vec{t}_{wu})$，对于任意节点$u\in V$，由于$\vec{q}_{wu}-\vec{t}_{wu}=m_u(\vec{P}_w-\vec{t}_{wu})$，任一边$(u,v)\in E$，将相邻节点上的摄像机模型相加得：$\vec{q}_{wu}+\vec{q}_{wv}-\vec{t}_{wu}-\vec{t}_{wv}=m_u(\vec{P}_w-\vec{t}_{wu})+m_v(\vec{P}_w-\vec{t}_{wv})$，解得：

$$\vec{P}_{w,(u,v)}=\frac{\vec{q}_{wu}+\vec{q}_{wv}}{m_u+m_v}+\frac{(m_u-1)\vec{t}_{wu}+(m_u-1)\vec{t}_{wv}}{m_u+m_v},$$

并且有：$\dfrac{\vec{q}_{wu}-\vec{t}_{wu}}{m_u}-\dfrac{\vec{q}_{wv}-\vec{t}_{wv}}{m_v}=\vec{t}_{wv}-\vec{t}_{wv}$. 将$|E|$个$\vec{P}_{w,(u,v)}$取平均值得多目立体视觉的三维重建公式(2).

3 热光的近场高阶空间相干性的三维重建公式

热光近场的经典成像系统如图 5 所示[9]，像平面上的光场是：

$$E(\vec{q}_j,z_j,t)=\int E(\vec{k},\omega;\vec{q}_o,z_0=0,t_0=0)g(\vec{k},\omega;\vec{q}_j,z_j,t)d\omega d\vec{k}. \tag{9}$$

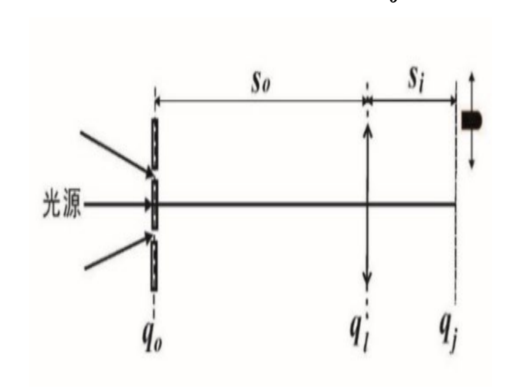


图 5 量子光学的成像系统图

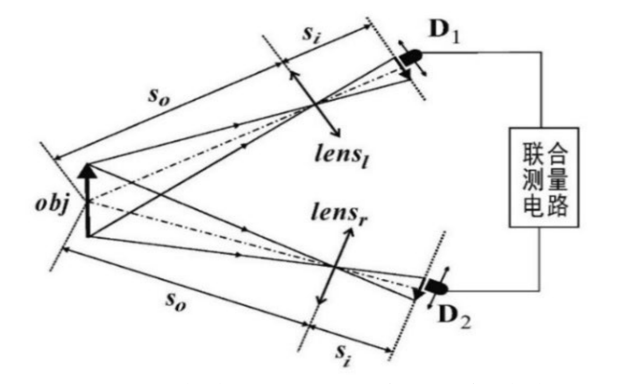


图 6 双目视觉的热光近场二阶相干性立体测量图

成像系统的格林函数是：$g(\vec{k},\omega;\vec{q}_j,z=s_o+s_i)$

$$=\int_{obj}d\vec{q}_o\int_{lens}d\vec{q}_l\left\{A(\vec{q}_o)e^{i\vec{k}\cdot\vec{q}_o}\right\}\left\{\frac{i\omega}{2\pi c}\frac{e^{i\frac{\omega}{c}s_o}}{s_o}G(|\vec{q}_l-\vec{q}_o|,\frac{\omega}{cs_o})\right\}\left\{G(|\vec{q}_l|,-\frac{\omega}{cf})\right\}\left\{\frac{i\omega}{2\pi c}\frac{e^{i\frac{\omega}{c}s_i}}{s_i}G(|\vec{q}_j-\vec{q}_l|,\frac{\omega}{cs_i})\right\}$$

其中$\vec{q}_o$、$\vec{q}_l$和$\vec{q}_j$分别是物平面、透镜平面和像平面上的二维坐标向量，$G(|\vec{\alpha}|,\beta)=e^{i(\frac{\beta}{2})|\vec{\alpha}|^2}$是菲涅耳相位因子(高斯函数)，$s_o$是物体和成像透镜间的距离，$s_i$是成像透镜和像平面间的距离，$A(\vec{q}_o)$是物体上光场的分布函数.

利用高斯函数的性质,上式简化为下述形式:

$$g(\vec{k},\omega;\vec{q}_j,z=s_o+s_i)=\frac{-\omega^2}{(2\pi c)^2 s_o s_i}e^{i\frac{\omega}{c}(s_o+s_i)}G(|\vec{q}_j|,\frac{\omega}{cs_i})\int_{obj}d\vec{q}_o A(\vec{q}_o)G(|\vec{q}_o|,\frac{\omega}{cs_o})e^{i\vec{k}\cdot\vec{q}_o}$$

$$\times\int_{lens}d\vec{q}_l G[|\vec{q}_l|,\frac{\omega}{c}(\frac{1}{s_o}+\frac{1}{s_i}-\frac{1}{f})]e^{-i\frac{\omega}{c}(\frac{\vec{q}_o}{s_o}+\frac{\vec{q}_j}{s_i})\cdot\vec{q}_l}. \tag{10}$$

对于半径为 R 的有限尺寸透镜,上式中的第二个重积分简化得到该成像系统的点扩展函数:

$$\int_{lens}d\vec{q}_l G[|\vec{q}_l|,\frac{\omega}{c}(\frac{1}{s_o}+\frac{1}{s_i}-\frac{1}{f})]e^{-i\frac{\omega}{c}(\frac{\vec{q}_o}{s_o}+\frac{\vec{q}_j}{s_i})\cdot\vec{q}_l}\propto somb(\frac{R}{s_o}\frac{\omega}{c}|\vec{q}_o+\frac{\vec{q}_j}{m}|). \tag{11}$$

其中 $somb(x)=\frac{2J_1(x)}{x}$, $J_1(x)$ 是一阶贝赛尔函数, $m=\frac{s_i}{s_o}$ 是成像系统的放大率.

热光的近场二阶空间相干函数[9]是:

$$\Gamma^{(2)}(\vec{q}_1,z_1;\vec{q}_2,z_2\})=\sum_j\sum_l|\frac{1}{\sqrt{2}}[E_j(\vec{q}_1,z_1)E_l(\vec{q}_2,z_2)+E_l(\vec{q}_1,z_1)E_j(\vec{q}_2,z_2)]|^2$$
$$=\int d\vec{k}_1 d\vec{k}_2|\frac{1}{\sqrt{2}}[g(\vec{q}_1,z_1,\vec{k}_1)g(\vec{q}_2,z_2,\vec{k}_2)+g(\vec{q}_2,z_2,\vec{k}_1)g(\vec{q}_1,z_1,\vec{k}_2)]|^2$$
$$=\int d\vec{k}_1|g(\vec{q}_1,z_1,\vec{k}_1)|^2\int d\vec{k}_2|g(\vec{q}_2,z_2,\vec{k}_2)|^2+|\int d\vec{k}g^*(\vec{q}_1,z_1,\vec{k})g(\vec{q}_2,z_2,\vec{k})|^2. \tag{12}$$
$$=\Gamma^{(1)}_{11}(\vec{q}_1,z_1)\Gamma^{(1)}_{22}(\vec{q}_2,z_2)+\Gamma^{(1)}_{12}(\vec{q}_1,z_1;\vec{q}_2,z_2).$$

将自由传播的格林函数 $g(\vec{q}_j,z_j,\vec{k})=\frac{-\omega}{2\pi c}\frac{e^{i\frac{\omega}{c}z_j}}{z_j}\int d\vec{q}_o A(\vec{q}_o)e^{i\vec{k}\cdot\vec{q}_o}e^{i\frac{\omega}{2cz_j}|\vec{q}_j-\vec{q}_o|^2}$ 代入上式得到一阶空间相干函数 $\Gamma^{(1)}_{11}\Gamma^{(1)}_{22}\sim$ 常数, $\Gamma^{(1)}_{12}(\vec{q}_1,z_1;\vec{q}_2,z_2\})=\int d\vec{k}g^*(\vec{q}_1,z_1,\vec{k})g(\vec{q}_2,z_2,\vec{k})$. 假设 $A^2(\vec{q}_o)\sim$ 常量, $z_1=z_2=d$, 则得到:

$$\Gamma^{(1)}_{12}(\vec{q}_1;\vec{q}_2)\propto e^{-i\frac{\omega}{2cd}(|\vec{q}_1|^2-|\vec{q}_2|^2)}\int d\vec{q}_o A^2(\vec{q}_o)e^{i\frac{\omega}{cd}(\vec{q}_1-\vec{q}_2)\cdot\vec{q}_o}\propto e^{-i\frac{\omega}{2cd}(|\vec{q}_1|^2-|\vec{q}_2|^2)}somb(\frac{R}{d}\frac{\omega}{c}|\vec{q}_1-\vec{q}_2|)$$

如图 6 所示,将 HBT 干涉仪在在两个独立观测点 $(\vec{q}_{wl},t_l)$ 和 $(\vec{q}_{wr},t_r)$ 的联合测量变为两个成像系统的联合测量, HBT 干涉仪就变成双目视觉的立体成像测量.

左右摄像机成像高斯透镜公式 $\frac{1}{s_{oj}}+\frac{1}{s_{ij}}=\frac{1}{f_j}, j\in\{l,r\}$, 将成像系统的格林函数(10)式代入到(12)式得:

$$\Gamma^{(1)}_{lr}(\vec{q}_{wl},z_l;\vec{q}_{wr},z_r)=|\int d\vec{k}g^*(\vec{q}_{wl},z_l,\vec{k})g(\vec{q}_{wr},z_r,\vec{k})|^2$$
$$=|\frac{-\omega^2}{(2\pi c)^2 s_{ol}s_{il}}e^{-i\frac{\omega}{c}(s_{ol}+s_{il})}G^*(|\vec{q}_{wl}|,\frac{\omega}{cs_{il}})\int_{obj_l}d\vec{q}_{ol}A(\vec{q}_{ol})G^*(|\vec{q}_{ol}|,\frac{\omega}{cs_{ol}})e^{-i\vec{k}\cdot\vec{q}_{ol}}$$
$$\times\int_{lens_l}d\vec{q}_{l_l}G^*[|\vec{q}_{l_l}|,\frac{\omega}{c}(\frac{1}{s_{ol}}+\frac{1}{s_{il}}-\frac{1}{f_l})]e^{i\frac{\omega}{c}(\frac{\vec{q}_{ol}}{s_{ol}}+\frac{\vec{q}_{wl}}{s_{il}})\cdot\vec{q}_{l_l}}$$

$$\times\frac{-\omega^2}{(2\pi c)^2 s_{or}s_{ir}}e^{i\frac{\omega}{c}(s_{or}+s_{ir})}G(|\vec{q}_{wr}|,\frac{\omega}{cs_{ir}})\int_{obj_r}d\vec{q}_{or}A(\vec{q}_{or})G(|\vec{q}_{or}|,\frac{\omega}{cs_{or}})e^{i\vec{k}\cdot\vec{q}_{or}}$$

$$\times\int_{lens_r}d\vec{q}_{l_r}G[|\vec{q}_{l_r}|,\frac{\omega}{c}(\frac{1}{s_{or}}+\frac{1}{s_{ir}}-\frac{1}{f_r})]e^{-i\frac{\omega}{c}(\frac{\vec{q}_{or}}{s_{or}}+\frac{\vec{q}_{wr}}{s_{ir}})\cdot\vec{q}_{l_r}}|^2.$$

设左右成像系统的物体上光场分布相同, $A(\vec{q}_{ol})=A(\vec{q}_{or})=A(\vec{q}_o)$, 则有:

$$\Gamma_{lr}^{(1)}(\vec{q}_{wl},z_l;\vec{q}_{wr},z_r)=|\frac{\omega^4}{(2\pi c)^4}\frac{1}{s_{ol}s_{or}s_{il}s_{ir}}e^{-i\frac{\omega}{c}(z_l-z_r)}G^*(|\vec{q}_{wl}|,\frac{\omega}{cs_{il}})G(|\vec{q}_{wr}|,\frac{\omega}{cs_{ir}})$$

$$\times\int_{obj}d\vec{q}_oA^2(\vec{q}_o)G^*(|\vec{q}_o|,\frac{\omega}{cs_{ol}})G(|\vec{q}_o|,\frac{\omega}{cs_{or}})\int_{lens_l}d\vec{q}_{l_l}G^*[|\vec{q}_{l_l}|,\frac{\omega}{c}(\frac{1}{s_{ol}}+\frac{1}{s_{il}}-\frac{1}{f_l})]e^{i\frac{\omega}{c}(\frac{\vec{q}_o}{s_{ol}}+\frac{\vec{q}_{wl}}{s_{il}})\cdot\vec{q}_{l_l}}$$

$$\times\int_{lens_r}d\vec{q}_{l_r}G[|\vec{q}_{l_r}|,\frac{\omega}{c}(\frac{1}{s_{or}}+\frac{1}{s_{ir}}-\frac{1}{f_r})]e^{-i\frac{\omega}{c}(\frac{\vec{q}_o}{s_{or}}+\frac{\vec{q}_{wr}}{s_{ir}})\cdot\vec{q}_{l_r}}|^2. \quad (13)$$

上式进一步再简化, 设 $s_{ol}=s_{or}=s_o, s_{il}=s_{ir}=s_i, m_l=m_r=m, f_l=f_r=f$, 则有:

$$\Gamma_{lr}^{(1)}(\vec{q}_{wl};\vec{q}_{wr})=|\frac{\omega^4}{(2\pi c)^4}\frac{1}{s_o^2s_i^2}G^*(|\vec{q}_{wl}|,\frac{\omega}{cs_i})G(|\vec{q}_{wr}|,\frac{\omega}{cs_i})\int_{obj}d\vec{q}_oA^2(\vec{q}_o)$$

$$\times\int_{lens_l}d\vec{q}_{l_l}G^*[|\vec{q}_{l_l}|,\frac{\omega}{c}(\frac{1}{s_o}+\frac{1}{s_i}-\frac{1}{f})]e^{i\frac{\omega}{c}(\frac{\vec{q}_o}{s_o}+\frac{\vec{q}_{wl}}{s_i})\cdot\vec{q}_{l_l}}$$

$$\times\int_{lens_r}d\vec{q}_{l_r}G[|\vec{q}_{l_r}|,\frac{\omega}{c}(\frac{1}{s_o}+\frac{1}{s_i}-\frac{1}{f})]e^{-i\frac{\omega}{c}(\frac{\vec{q}_o}{s_o}+\frac{\vec{q}_{wr}}{s_i})\cdot\vec{q}_{l_r}}|^2$$

$$=|\frac{\omega^4}{(2\pi c)^4}\frac{1}{s_o^2s_i^2}e^{i\frac{\omega}{2cs_i}(|\vec{q}_{wr}|^2-|\vec{q}_{wl}|^2)}\int_{obj}d\vec{q}_oA^2(\vec{q}_o)$$

$$\times\int_{lens_l}d\vec{q}_{l_l}G^*[|\vec{q}_{l_l}|,\frac{\omega}{c}(\frac{1}{s_o}+\frac{1}{s_i}-\frac{1}{f})]e^{i\frac{\omega}{c}(\frac{\vec{q}_o}{s_o}+\frac{\vec{q}_{wl}}{s_i})\cdot\vec{q}_{l_l}}$$

$$\times\int_{lens_r}d\vec{q}_{l_r}G[|\vec{q}_{l_r}|,\frac{\omega}{c}(\frac{1}{s_o}+\frac{1}{s_i}-\frac{1}{f})]e^{-i\frac{\omega}{c}(\frac{\vec{q}_o}{s_o}+\frac{\vec{q}_{wr}}{s_i})\cdot\vec{q}_{l_r}}|^2.$$

由于$(\frac{\vec{q}_o}{s_o}+\frac{\vec{q}_{wr}}{s_i})\cdot\vec{q}_{l_r}-(\frac{\vec{q}_o}{s_o}+\frac{\vec{q}_{wl}}{s_i})\cdot\vec{q}_{l_l}=\frac{1}{s_o}[\vec{q}_o\cdot(\vec{q}_{l_r}-\vec{q}_{l_l})+\frac{\vec{q}_{wr}}{m}\cdot\vec{q}_{l_r}-\frac{\vec{q}_{wl}}{m}\cdot\vec{q}_{l_l}]$

$$=\frac{1}{s_o}[(\vec{q}_o+\frac{\vec{q}_{wr}+\vec{q}_{wl}}{2m})\cdot(\vec{q}_{l_r}-\vec{q}_{l_l})+\frac{1}{2m}(\vec{q}_{wr}-\vec{q}_{wl})\cdot(\vec{q}_{l_r}+\vec{q}_{l_l})].$$

高斯透镜公式成立时有:

$$\int_{lens_l}d\vec{q}_{l_l}G^*[|\vec{q}_{l_l}|,\frac{\omega}{c}(\frac{1}{s_o}+\frac{1}{s_i}-\frac{1}{f})]e^{i\frac{\omega}{c}(\frac{\vec{q}_o}{s_o}+\frac{\vec{q}_{wl}}{s_i})\cdot\vec{q}_{l_l}}\int_{lens_r}d\vec{q}_{l_r}G[|\vec{q}_{l_r}|,\frac{\omega}{c}(\frac{1}{s_o}+\frac{1}{s_i}-\frac{1}{f})]e^{-i\frac{\omega}{c}(\frac{\vec{q}_o}{s_o}+\frac{\vec{q}_{wr}}{s_i})\cdot\vec{q}_{l_r}}$$

$$=\int_{lens_l}d\vec{q}_{l_l}e^{i\frac{\omega}{c}(\frac{\vec{q}_o}{s_o}+\frac{\vec{q}_{wl}}{s_i})\cdot\vec{q}_{l_l}}\int_{lens_r}d\vec{q}_{l_r}e^{-i\frac{\omega}{c}(\frac{\vec{q}_o}{s_o}+\frac{\vec{q}_{wr}}{s_i})\cdot\vec{q}_{l_r}}$$

$$=\int_{lens_l}\int_{lens_r} d(\vec{q}_{l_r}-\vec{q}_{l_l})e^{-i\frac{\omega}{cs_o}(\vec{q}_o+\frac{\vec{q}_{wr}+\vec{q}_{wl}}{2m})\cdot(\vec{q}_{l_r}-\vec{q}_{l_l})}\int_{lens_l}\int_{lens_r} d(\vec{q}_{l_r}+\vec{q}_{l_l})e^{-i\frac{\omega}{2cms_o}(\vec{q}_{wr}-\vec{q}_{wl})\cdot(\vec{q}_{l_r}+\vec{q}_{l_l})}.$$

所以得到热光近场一阶相干函数的三维重建公式(3).

在一阶相干函数$\Gamma_{lr}^{(1)}$式中,$\vec{q}_0=-\vec{P}_w$,扩展函数$somb(\frac{R}{s_o}\frac{\omega}{c}|\vec{q}_o+\frac{\vec{q}_{wl}+\vec{q}_{wr}}{2m}|)$中有世界坐标系中的向量$\vec{P}_w$,扩展函数$somb(\frac{R}{s_i}\frac{\omega}{c}|\vec{q}_{wl}-\vec{q}_{wr}|)$包括两幅图像上对应点$\vec{q}_{wl}$、$\vec{q}_{wr}$的视差信息.

所以由(3)式,对双目视觉的两幅图像进行联合符合测量,重建物体的三维图形,并且扩展函数$somb(\frac{R}{s_i}\frac{\omega}{c}|\vec{q}_{wl}-\vec{q}_{wr}|)$对左右两幅图像对应点同时进行了实时立体匹配.

设$|V|$个光探测器分别位于连通图$G=G(V,E)$的节点上,将HBT干涉仪在$|V|$个独立观测点$(\vec{q}_{wu},t_u)(u\in V)$联合测量变为$|V|$个成像系统的联合测量,$HBT$干涉仪就变成多目视觉的立体成像测量,热光的近场$|V|$阶空间相干函数[9]是:

$$\Gamma^{(|V|)}(\vec{q}_1,z_1;\cdots,\vec{q}_{|V|},z_{|V|})=\langle E^*(\vec{q}_1,z_1)E(\vec{q}_1,z_1)E^*(\vec{q}_2,z_2)E(\vec{q}_2,z_2)\cdots E^*(\vec{q}_{_{|V|}},z_{_{|V|}})E(\vec{q}_{_{|V|}},z_{_{|V|}})\rangle$$

$$\simeq\sum_{j,k,l,\cdots}\left|\frac{1}{\sqrt{|V|!}}\sum_{|V|!}(E_{j1}E_{k2}E_{l3}\cdots)\right|^2.$$

文献[9]中测量了热光的非平庸三阶相干函数,并且有一系列不寻常和有趣的性质,实验结果和理论模拟的结果在统计误差范围内符合得很好,用类似的方法也可以对于$|V|$个成像系统的高阶相干性进行实验检验其正确性.设第u个成像系统的格林函数是:

$$g(\vec{k},\omega;\vec{q}_{wu},z_u=s_{ou}+s_{iu})=\frac{-\omega^2}{(2\pi c)^2 s_{ou}s_{iu}}e^{i\frac{\omega}{c}(s_{ou}+s_{iu})}G(|\vec{q}_{wu}|,\frac{\omega}{cs_{iu}})\int_{obj}d\vec{q}_{ou}A(\vec{q}_{ou})G(|\vec{q}_{ou}|,\frac{\omega}{cs_{ou}})e^{i\vec{k}\cdot\vec{q}_{ou}}$$

$$\times\int_{lens}d\vec{q}_{lu}G[|\vec{q}_{lu}|,\frac{\omega}{c}(\frac{1}{s_{ou}}+\frac{1}{s_{iu}}-\frac{1}{f_u})]e^{-i\frac{\omega}{c}(\frac{\vec{q}_o}{s_{ou}}+\frac{\vec{q}_{wu}}{s_{iu}})\cdot\vec{q}_{lu}},$$

$$\int_{lens}d\vec{q}_{lu}G[|\vec{q}_{lu}|,\frac{\omega}{c}(\frac{1}{s_{ou}}+\frac{1}{s_{iu}}-\frac{1}{f_u})]e^{-i\frac{\omega}{c}(\frac{\vec{q}_{ou}}{s_{ou}}+\frac{\vec{q}_{wu}}{s_{iu}})\cdot\vec{q}_{lu}}\propto somb(\frac{R}{s_o}\frac{\omega}{c}|\vec{q}_{ou}+\frac{\vec{q}_{wu}}{m_u}|).$$

其中$\vec{q}_{ou}$、$\vec{q}_{lu}$和$\vec{q}_{wu}$分别是物平面、透镜平面和像平面上的二维坐标向量,$m_u=\frac{s_{iu}}{s_{ou}}$是第$u$个成像系统的放大率.

对于连通图$G=G(V,E)$,由文献[9]的三阶空间相干函数得到热光的近场$|V|$阶空间相干函数:

$$\Gamma^{(|V|)}(\vec{q}_{w1},z_1;\cdots,\vec{q}_{w|V|},z_{|V|})\simeq\sum_{U\subset V}\left[\prod_{b\in U}\left|\int d\vec{k}g(\vec{k};\vec{q}_{wb},z_b)\right|^2\left(\prod_{(u,v)\in E_U}\int d\vec{k}g^*(\vec{k};\vec{q}_{wu},z_u)g(\vec{k};\vec{q}_{wv},z_v)\right)\right.$$

$$+\prod_{(u,v)\in E_U}\int d\vec{k}g\left(\vec{k};\vec{q}_{wu},z_u\right)g^*\left(\vec{k};\vec{q}_{wv},z_v\right)\Big)\Big]\propto\sum_{U\subset V}\prod_{(u,v)\in E_U}\Gamma_{uv}^{(1)}(\vec{q}_{wu},z_u;\vec{q}_{wv},z_v).$$

对于任意的节点u、$v\in V$，设$s_{ou}=s_{ov}=s_o, s_{iu}=s_{iv}=s_i, m_u=m_v=m, f_u=f_v=f, z_u=z_v=d$，$|V|$个成像系统的光探测器位于半径为$d$的球面上，物体光场分布相同，$A(\vec{q}_{ou})=A(\vec{q}_{ov})=A(\vec{q}_o)$

则有：

$$\Gamma_{uv}^{(1)}(\vec{q}_{wu};\vec{q}_{wv})\propto\left|e^{i\frac{\omega}{2cs_i}(|\vec{q}_{wu}|^2-|\vec{q}_{wv}|^2)}\int_{obj}d\vec{q}_o A^2(\vec{q}_0)\,somb\left(\frac{R}{s_o}\frac{\omega}{c}|\vec{q}_o+\frac{\vec{q}_{wu}+\vec{q}_{wv}}{2m}|\right)somb\left(\frac{R}{s_i}\frac{\omega}{c}|\vec{q}_{wu}-\vec{q}_{wv}|\right)\right|^2.$$

所以得到多视图立体成像的三维重建公式(4).

4 双目立体视觉热光的近场二阶相干性机制

双目立体视觉是由于物体在双眼成像的水平视差,相对于头部,两只眼对场景中物体的感知是沿着相同的头位中心视觉方向,就相当于从两眼中间的“中央眼”看外物,两眼的视觉中心方向形成一个共同的视觉方向即两眼的平均方向[8].文中得的三维重建公式(1)和(3)中也恰好包含两眼成像平面上平均的中心坐标$\frac{\vec{q}_{wl}+\vec{q}_{wr}}{2}$,与视觉神经科学理论相一致.

人类视觉系统有 V1 、V2 等视觉皮层[20,21], V1 层不同区域第 4C 层细胞接受来自外膝状体的单侧和对侧单眼信息输入,在随后的其他层中双眼信息有不同程度的汇聚,第 4C 层以外的细胞 80%以上为双眼驱动.次级视皮质 V2 区紧邻 V1 并接收其有序投射. V2 区的大部分受双眼驱动的视差细胞参与立体视觉信息处理.双眼驱动型细胞在左、右眼各有一个相对应的感受野,两侧感受野处于两侧视野相对应的空间位置上,两侧感受野具有相似的时空特征,多数细胞对两侧感受野的空间视差非常敏感,所以双眼驱动型细胞就相当于热光的近场二阶相干性测量的联合符合测量电路.

中央眼立体感知如图 7 所示[22, 23]的随机点立体图(Wandell, 1995 年; Juksz, 1964 年), 是一个由一只眼睛观看的随机点图案, 另一只眼睛的刺激是通过复制第一张图像, 水平移动一个特定的区域, 然后用随机的点样本填充空隙来产生的. 当双眼同时但独立地观看左右图像时（通过使用立体镜或通过立体匹配会聚或发散眼睛来融合图像）移位区域（正方形）的平面看起来向上凸起, 大脑感知到深度信息. 双眼以外还有第三只中央眼感知到立体图像, 随机点图毫无意义, 双眼仅仅通过视差信息就能感知到深度信息. 光的近场二阶干性测量也只需要左右两幅图像的立体匹配的对应信息就能形成立体图像, 联合测量的 HBT 干涉仪就是“中央眼”.

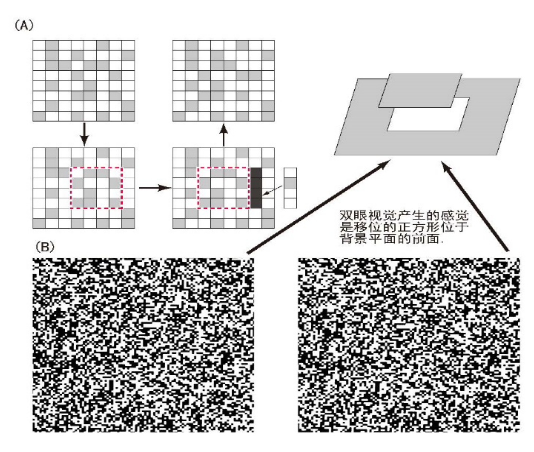


图 7 Juksz 随机点图的双眼融合感知图

所以大脑视觉系统的双眼立体感知是左右眼两个感光观测细胞对物体光场进行二阶相干性测量,本节中关于视觉神经科学的理论知识为文中的(1)式和(3)式提供了神经科学基础.

5 结论

本文得到多目视觉的几何学三维重建方法,由热光的近场高阶相干性测量得到立体成像的扩展函数三维重建公式,并且在高阶相干性测量的同时就自然完成了实时立体匹配.两种三维重建方法类似,有充分的视觉神经科学基础.

参考文献

[1] 高宏伟.计算机双目立体视觉[M].北京:电子工业出版社,2012:129-149.

[2] 张广军.视觉测量[M].北京:科学出版社,2008:134-174.

[3] 谢剑斌,陈章永,刘 通 等.视觉仿生学原理与应用[M].北京:科学出版社,2013:95-128.

[4] 张孝伍.齐次线性方程组约束的三维重建方法[J].宁夏大学学报:自然科学版,2021(4):383-390.

[5] 理查德·哈特利,安德鲁·西塞曼.计算机视觉中的多视图几何(第2版)[M].韦 穗,章权兵 译.北京:机械工业出版社,2020:203-354.

[6] 孔庆群,明雁声,胡占义.视皮层中的视差计算[J].自动化学报,2011(6):645-657.

[7] 孔庆群,明雁声,胡占义.加权视差能量模型[J].自动化学报,2014(2):227-235.

[8] John S.Werner,Leo M.Chalupa.The new visual neurosciences[M].The Massachusetts Institute of Technology Press,2014:809-824.

[9] 史硕华.量子光学导论—单光子和双光子物理[M].徐 平 译.北京:高等教育出版社,2016:44-104,254-289.

[10] 吴健.光的经典二阶相干性[M].北京:科学出版社,2017:50-99.

[11] 王晓茜,高 超,姚治海.经典理论视野下的计算鬼成像技术[M].北京:科学出版社,2022:8-24.

[12] 李荣华.双目立体视觉理论及其应用[M].北京:科学出版社,2020:14-135.

[13] 李明磊.计算机视觉三维测量与建模[M].北京:电子工业出版社,2022:1-29,116-151.

[14] 彭亚丽.多视角三维重建技术[M].北京:科学出版社,2021:1-50,.

[15] 吴福朝.计算机视觉中的数学方法[M].北京:科学出版社,2008:46-78,227-244.

[16] 张宗华,刘巍,刘国栋 等.三维视觉测量技术及应用进展[J].中国图形图像学报,2021(6):1483-1498

[17] 龙霄潇,程新景,朱 昊,等.三维视觉前沿进展[J].中国图形图像学报,2021(6):1389-1428.

[18] 郑雅菁,余肇飞,黄铁军.生物视觉系统的神经网络编码模型综述[J].中国图形图像学报,2023(2):335-357.

[19] 郑太雄,黄 帅,李永福,等.基于视觉的三维重建关键技术研究综述[J].自动化学报,2020(4):631-652.

[20] Eric R.Kandel,John D.Koester,Sarah H.Mack,et al.Principles of neural science(Sixt Edition)[M].Copyright 2021 by McGraw Hill,All rights reserved:496-597.

[21] A.Robert Martin,David A.Brown,Mathew E.Diamond.From neuron to brain(sixth edition)[M].Oxfor University Press,2020:23-59.

[22] Dale Purves,George J. Augustine,David Fitzpatrick,et al.Neuroscience(Sixth Edition)[M].Oxfor University Press,2018:233-280.

[23] 哈维·理查德·施夫曼.感觉与知觉(第5版)[M].李乐山 译.西安:西安交通大学出版社,2014:229-258.

作者贡献声明[i]:

[i] 张孝伍：提出研究思路，设计研究方案；论文起草;论文最终版本修订。